

УДК 551.583.7(268.6)

ПРОГНОЗ ПРИРОДНЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ЛЕДОВИТОСТИ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ НА БЛИЖАЙШИЕ СТОЛЕТИЯ

© 2024 г. В. В. Бабич^{1,2,*}, А. С. Астахов^{2,**}

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 10.07.2023 г.

Поступило 10.07.2023 г.

После доработки 05.09.2023 г.

Принято к публикации 12.09.2023 г.

На основе результатов спектрального анализа реконструированных для последних пяти тысяч лет температуры воздуха и ледовитости шельфа Восточно-Сибирского моря построены эмпирические прогнозные модели, отображающие “естественный сценарий” динамики этих климатических параметров в ближайшие столетия. Исходя из результатов прогнозных построений, в будущем длительность безледного периода так же, как и температура приповерхностного воздуха, будут иметь тенденцию к возрастанию. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о наличии антропогенного влияния на температурный режим и ледовую обстановку изучаемого региона, проявившегося в индустриальный период. С учетом этого фактора можно предположить, что интенсивность исследуемых природных явлений будет возрастать более высокими темпами, чем отображается модельными построениями.

Ключевые слова: палеоклиматология, прогноз, морской лед, аномалии среднегодовой температуры воздуха, геохимия, арктическая осцилляция, солнечная радиация, Восточно-Сибирское море

DOI: 10.31857/S2686739724010179

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что климат оказывает огромное влияние на условия жизни человека и играет большую роль в его истории. Имеются многочисленные факты связи крупных политических, социальных и экономических потрясений с климатическими событиями [1, 2]. В настоящее время ведется широкая дискуссия о причинах современного “глобального потепления” в связи с возможными негативными последствиями этого явления для человеческой цивилизации. В этой связи весьма актуальной представляется проблема построения разнообразных прогнозных моделей грядущих климатических изменений и связанных с ними природных явлений.

Формирование климата определяется взаимодействием многочисленных разномасштабных природных явлений и процессов. В настоящее время можно выделить два подхода к построению прогнозных климатических моделей: имитационный физико-математический и эмпирический. Суть физико-математического моделирования сводится к априорной формулировке набора природных и антропогенных факторов, влияющих на изучаемый климатический процесс или связанное с ним природное явление, с указанием в строго формализованной форме их прямых и обратных связей. Задавая различные сценарии поведения климатоформирующих параметров, можно генерировать модели климатического развития в будущем. Результаты такого моделирования регулярно публикуются Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в обзорах фактического состояния глобальной климатической системы [3].

При построении эмпирических моделей никакой информации о природных факторах, определяющих состояние системы, и их взаимосвязях не требуется, поскольку в данном случае построение модели основывается на исследовании

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск, Россия

²Тихоокеанский океанологический институт им.
В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской
Академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: vbabich@igm.nsc.ru

**E-mail: astakhov@poi.dvo.ru

некоторого достаточно репрезентативного объема данных о поведении исследуемой системы во времени. Конечная цель эмпирического моделирования — выявление закономерностей в поведении изучаемого явления, выражающихся в виде формул, уравнений, корреляционных зависимостей, графиках и т.д., которые позволяют экстраполировать поведение изучаемой системы за пределы исходного временного ряда. При этом содержательная интерпретация выделяемых закономерностей для получения конечного результата не обязательна.

Безусловно, физико-математический подход к построению моделей является более строгим и эффективным при исследовании достаточно хорошо изученных процессов. Однако взаимоотношения между многочисленными климатообразующими параметрами настолько сложны, разнообразны и трудно формализуемы, что учесть их в полной мере при построении климатических моделей практически невозможно. Привлечение же эмпирического моделирования весьма эффективно при исследовании еще недостаточно хорошо изученных явлений, а поскольку климатообразование на данный момент не имеет однозначного строгого математического описания, применение при его изучении данного подхода представляется вполне оправданным.

В последние годы наблюдается существенная активизация хозяйственной деятельности в шельфовой части Восточной Арктики, обусловленная интенсификацией поисковых и добычных работ месторождений полезных ископаемых, прокладки трубопроводов и кабелей связи, налаживания транспортно-логистической системы Северного морского пути. В этой связи все большее значение приобретает изучение климатических изменений и связанных с ними явлений в морских бассейнах Восточной Арктики, которые во многом определяют успешность указанных хозяйственных проектов.

В данной работе предпринята попытка на примере акватории Восточно-Сибирского моря путем анализа данных о прошлых состояниях приповерхностной температуры воздуха и длительности безледного периода в данном регионе на достаточно длительном временном интервале выявить определенные закономерности в их вариациях и путем экстраполяции на ближайшее будущее построить эмпирическую модель сценария тренда этих явлений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходными данными для статьи послужили результаты реконструкции продолжительности безледного периода и аномалий среднегодовой температуры воздуха на поверхности для последних восьми тысяч лет по колонке LV77-36 из западной части Восточно-Сибирского моря [4]. Колонка была получена в российско-китайской экспедиции 77 рейса НИС “Академик М.А. Лаврентьев” в 2016 г. в точке с координатами 155.66° в.д., 74.10°с.ш. с глубиной моря 36.0 м (рис. 1).

Возрастная модель колонки была обоснована двенадцатью AMS¹⁴C-датировками раковин двустворчатых моллюсков с корректировкой по семи датировкам кварца методом оптически-стимулированной люминесценции [7].

Исследования химического состава кернового материала показали наличие корреляционной зависимости вещественного состава донных осадков от температурного режима и ледовой обстановки в данном регионе [6, 8], что позволило на основе многомерного регрессионного анализа построить палеореконструкции этих показателей на всю глубину керна [4]. Данные реконструкции на интервале последних 5000 лет (рис. 2), когда положение уровня моря соответствовало современному, и послужили исходным материалом для построения прогнозных сценариев изменения региональной температуры приповерхностного воздуха и ледовитости в ближайшие столетия на акватории Восточно-Сибирского моря. Соответственно использовались реконструированные с десятилетним осреднением [8] (далее “среднедесятилетние”) среднегодовые температура воздуха на поверхности (T , °C: отклонение от средней величины за 1986–2005 гг. в данной точке) и продолжительность безледного периода (IF) в декадах (10 дней).

Изменения климата нашей планеты имеют явно выраженный колебательный характер, а периоды наблюдаемых циклических ритмов составляют от нескольких лет до тысячелетий ([9–15] и др.). Наличие разнопериодных циклических изменений в динамике климата и связанных с ним природных явлений в течение голоцена устанавливаются и для территории арктических морей [4, 8, 15, 16]. Выявление подобных разночастотных периодичностей при анализе климатических хронологий методами гармонического анализа дает возможность решать разнообразные содержательные задачи [11, 12, 14, 17–19], в том числе

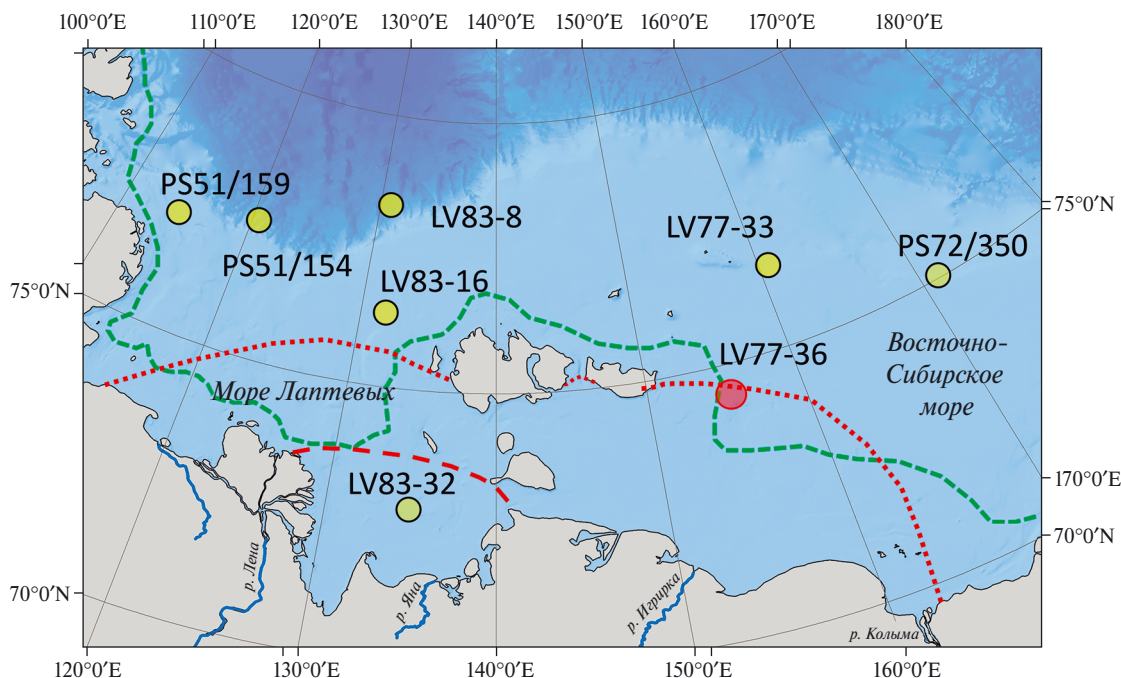


Рис. 1. Местоположение колонки LV77-36 и других колонок, используемых в работе (по [5–7]). Зеленой штриховой линией показана южная граница дрейфующих льдов; красными штриховой и точечной линиями показаны изолинии солёности в июле–сентябре 17 и 23‰ соответственно (по [7]).

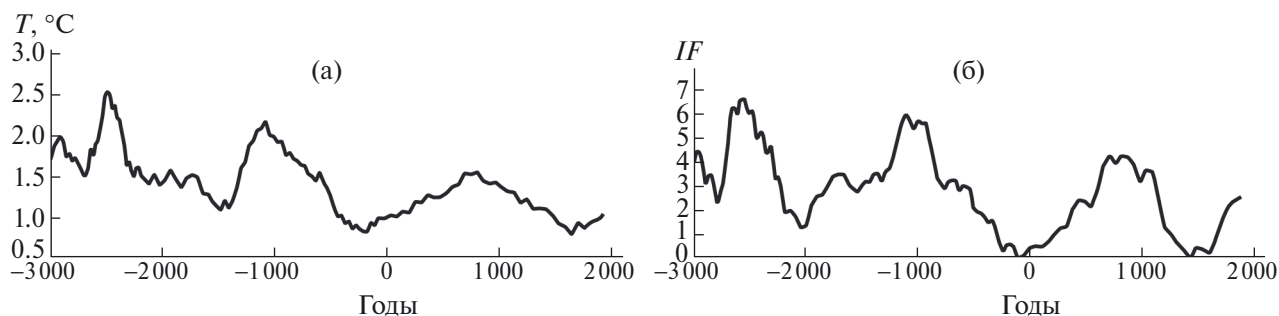


Рис. 2. Палеорекострукции аномалий среднесеколетних температуры воздуха на поверхности (а) и продолжительности безледного периода (б) в течение последних 5 тысяч лет на станции LV77-36 (по [4]).

строить краткосрочные и долгосрочные климатические прогнозы [15, 20].

В данном случае для анализа вышеуказанных палеорекострукций был использован метод коррелограммной аддитивной декомпозиции (МКАД) [20]. Данный метод позволяет разлагать любой сложный временной ряд данных на несколько составляющих функций, представляющих собой линейный тренд и набор разноточных квазипериодических колебаний. В сравнении с более широко известными методами,

такими как преобразование Фурье или вейвлет-анализ, данный метод достаточно прост, не требует задания априорного функционального базиса (составляющие функции выводятся адаптивно непосредственно из анализируемого ряда) и вполне пригоден для анализа сложных нелинейных и нестационарных процессов.

МКАД решает данную задачу по следующей алгоритмической схеме. На первом шаге выявляется линейный тренд анализируемого временного ряда, который вычитается из исходной

хронологии. Далее детрендированный временной ряд подвергается многократному экспоненциальному сглаживанию методом скользящего среднего с пошаговым уменьшением окна сглаживания. Если в процессе обработки сглаженная функция достигает метастабильного состояния, т.е. на протяжении нескольких итераций сохраняет практически неизменяемую форму, то этот сигнал принимается за первую квазипериодичность, вычитается из исходной функции, и процесс обработки продолжается. Выделение составляющих компонент производится автоматически путем выявления характерных точек на коррелограмме, отображающей процесс сглаживания. В итоге производится разложение исходного временного ряда на линейный тренд и ряд квазипериодических составляющих, от низкочастотных до высокочастотных, и остаток, в сумме дающий исходную функцию: $X(t) = Tr(t) + \sum C_k(t) + R(t)$, где $X(t)$ – исходный временной ряд; $Tr(t)$ – тренд; $C_k(t)$ – квазипериодические составляющие, $k = 1, 2, \dots, n$, n – число выявленных слагаемых; $R(t)$ – последняя остаточная функция.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По описанной методике был проведен спектральный анализ реконструкций температурного режима и ледовой обстановки в шельфовой зоне Восточно-Сибирского моря за последние пять тысяч лет. Чтобы исключить возможное влияние антропогенного фактора на результаты анализа, обработке подверглись временные ряды до 1850 г.н.э., который обычно принимается за начало индустриального периода. Результаты проведенного анализа представлены на рис. 3 и 4.

Как видно из рисунков, анализируемые реконструкции были разложены на тренды и совокупность квазипериодических составляющих, сумма которых в точности совпадает с исходными временными рядами, т.е. если экстраполировать выделенные составляющие на некоторый интервал времени с последующим их суммированием, то можно построить эмпирическую прогнозную модель, отображающую сценарий “естественного” развития анализируемых природных процессов в будущем. Однако поскольку выделяемые спектральным анализом составляющие имеют квазипериодический характер, реализация данной процедуры сталкивается с некоторыми неопределенностями и несет элемент субъективизма. Чтобы придать процедуре экстраполяции максимальную строгость и однозначность, для каждой квазипериодичности была подобрана аппроксимирующая

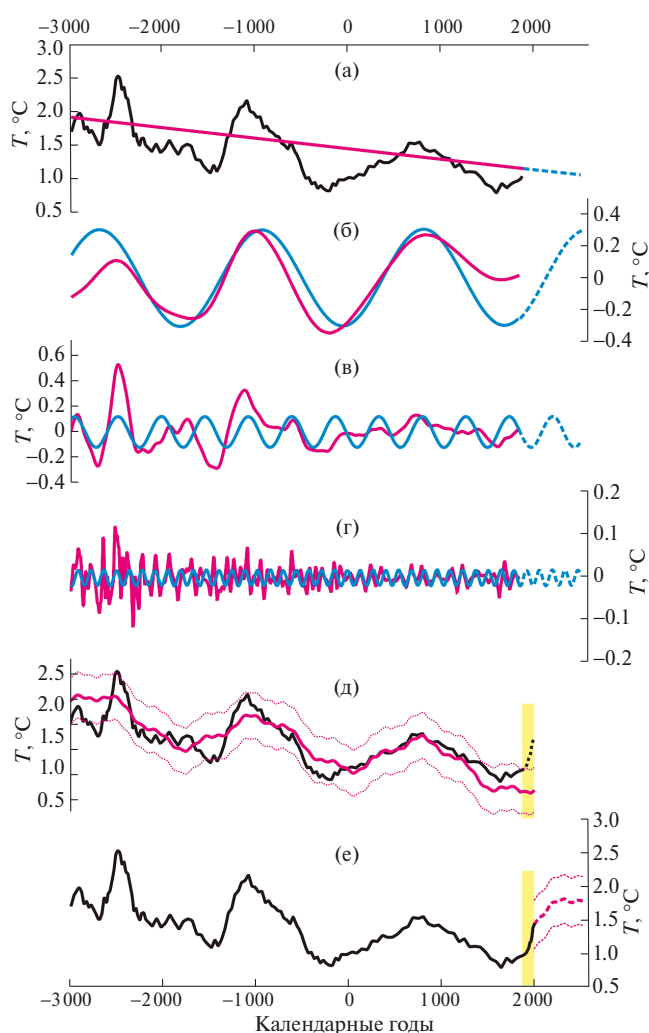


Рис. 3. Результаты спектрального анализа вариаций среднесеколетней температуры воздуха для последних 5000 лет, реконструированных по колонке LV77-36, и прогноз на ближайшие 500 лет. а – исходная температурная реконструкция (черная линия), линейный тренд (красная линия) и его экстраполяция на ближайшие 500 лет (синяя пунктирная линия); б, в, г – выделенные 1740-, 470- и 140-летние квазипериодичности (красные линии), аппроксимирующие их синусоиды (сплошные синие линии) и их экстраполяция на ближайшие 500 лет (синие пунктирные линии); д – сопоставление температурной реконструкции (черная линия, пунктиром показаны инструментальные измерения) с временным рядом, полученным при суммировании тренда и аппроксимирующих синусоид (красная линия, пунктиром показан 95% доверительный интервал); е – прогноз температурного режима с указанием 95% доверительного интервала. Значения температур на диаграммах б, в, г указаны в аномалиях относительно предыдущей составляющей. Желтой заливкой показан техногенный период.

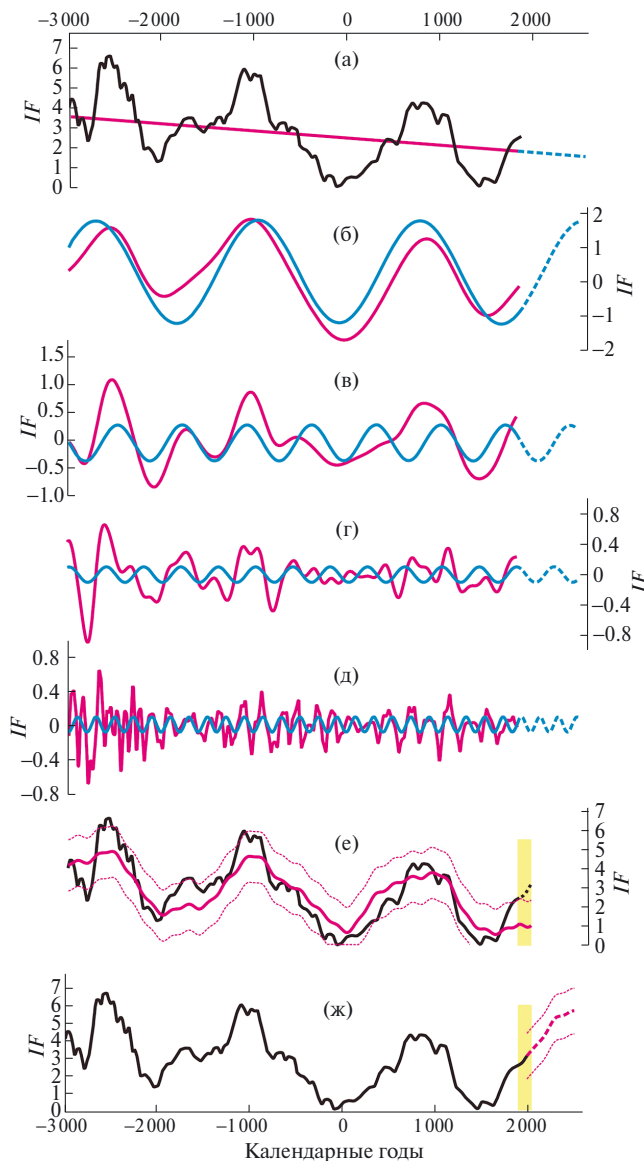


Рис. 4. Результаты спектрального анализа среднедесятилетней продолжительности безледного периода (IF, декады) для последних 5000 лет, реконструированной по колонке LV77-36, и прогноз на ближайшие 500 лет. Условные обозначения аналогичны рис. 3. Значения продолжительности безледного периода на диаграммах б, в, г, д (субпериодичности 1750, 700, 400 и 200 лет соответственно) указаны в аномалиях относительно предыдущей составляющей.

ее синусоида (рис. 3 б-г, 4 б-д). Оптимизируемыми критериями при этом являлись максимизация коэффициента корреляции между квазипериодичностью и синусоидой (оптимизация периодичности) и минимизация величины $S = \sum |X_i - Y_i|$, где X_i и Y_i — значения

квазипериодичности и синусоиды для i -го года (оптимизация амплитуды).

Путем сопоставления исходных реконструкций с временными рядами, получаемыми суммированием трендов и аппроксимирующих синусоид, была оценена погрешность, возникающая при замене квазипериодичностей синусоидами: для температурной реконструкции погрешность, оцениваемая 95% доверительным интервалом, составила $\pm 0.36^\circ\text{C}$ (при $r = 0.86$ и $r^2 = 0.74$); для реконструкции безледного периода — ± 1.32 (при $r = 0.87$ и $r^2 = 0.75$) (рис. 3 д, 4 е).

Путем экстраполяции суммы тренда и синусоид от современного состояния исследуемых природных явлений на ближайшие 500 лет были получены сценарии развития температурного режима и величины безледного периода в пределах шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря на данный временной интервал, определяемые внешними природными воздействиями без учета антропогенного фактора (рис. 3 е, 4 ж).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленные общий тренд и субпериодичности изменения продолжительности безледного периода и температуры воздуха на поверхности на станции LV77-36 могут быть объяснены исходя из существующих представлений об изменчивости климата в Арктике. Тренды увеличения ледовитости (уменьшения IF) и уменьшения T (рис. 3, 4) соответствуют орбитально обусловленному изменению общей солнечной радиации летом на этих широтах [7].

Ранее [4] самая длительная субпериодичность, выделенная по вариациям IF и T (1740–1750 лет) в колонке LV77-36 была сопоставлена с циклами Бонда (1470 ± 500 лет), выявленными в Северной Атлантике по смене направления айсбергового разноса в голоцене [16]. Природа этих циклов и близких им циклов Дашгорн-Эшгерда, проявляющихся в ледниковые периоды, дискутируется. В море Лаптевых с этими циклами сопоставлена периодичность изменения ледовых условий 1500 ± 500 лет, выявленная по биомаркерам [5]. В восточноарктических морях эти циклы были определены по смене направления переноса льдов из Карского моря (1560 лет) или из моря Лаптевых (1700 лет) [16] и сопоставлены с вариациями Арктической осцилляции (АО). Последняя отражает тип барической ситуации над Арктическим океаном, отчего, прежде всего, зависит направление ветра и, соответственно, движение льдов и поверхностных вод.

Для короткопериодных субпериодичностей в большей степени проявляется связь с солнечными циклами. Для T используемые субпериодичности 470 и 140 лет (рис. 3 в, г) имеют аналоги в циклах общей солнечной радиации 500 и 140 лет [16], хотя они прослеживаются и в циклах АО, определенных по выносу льдов из моря Лаптевых, 480 и 131 лет соответственно ([16], supplementary data).

Из выявленных субпериодичностей IF длительностью 1740, 700, 400 и 200 лет (рис. 4 б–д) аналоги в циклах АО имеются для длиннопериодных (1700, 690 лет) и, вероятно, для 400 лет (380 лет) ([16], supplementary data). Субпериодичность же 200 лет соответствует одному из основных циклов солнечной активности Зюсс-деВриеса (Suess-deVries) (200 лет) [20] и имеет аналог в вариациях суммарной солнечной иррадиации в виде отчетливо выраженных циклов 210 лет [16]. Установлено, что водный и тепловой сток рек Сибири, в значительной мере зависящий от изменений солнечной иррадиации, в силу ряда факторов влияет на ледовые условия арктического шельфа, в том числе на станцию LV77–36 [7], находящуюся на шельфе Восточно-Сибирского моря в зоне распреснения морских вод речными выносами (рис. 1). Таким образом, можно предполагать, что помимо атмосферных вариаций (АО) в изменчивости ледовых условий и температуры на данной станции и, соответственно, в их прогнозе, сказывается влияние различных климатообразующих процессов, в том числе проявляющихся на материке.

Прогноз изменения T и IF в ближайшие столетия (рис. 3 е, 4 ж) основан на выявленных природных закономерностях (трендах и цикличности) в поведении данных параметров на протяжении последних пяти тысяч лет без учета индустриального периода, когда возможно влияние антропогенного фактора на изучаемые природные явления. Т. е. представленные варианты изменения температуры и ледовой обстановки в исследуемом регионе отображают “естественный” сценарий без учета возможного проявления техногенного воздействия на окружающую среду в будущем. Однако сопоставление результатов инструментальных измерений значений T и IF в период после 1850 г. с моделью их “естественного” поведения показывает тенденцию их выхода за верхний предел 95% доверительного интервала, что может свидетельствовать о наличии влияния антропогенного фактора на температуру и продолжительность безледного периода в сторону их увеличения (рис. 3 д, 4 е). Следует

отметить, что по результатам реконструкций ледовых условий по материалам других станций морей Лаптевых и Восточно-Сибирского (рис. 1) также отмечено уменьшение ледовитости в последнее столетие [5, 6]. Особенно наглядно влияние индустриализации проявляется на температурной кривой, где превышение инструментально измеряемых показателей над “модельными” составляет около 0.5°C (рис. 3 д). Учитывая, что прогноз продолжен от уровня современного состояния параметров, в нем учтены изменения, вызванные антропогенным влиянием за индустриальный период. Можно предполагать, что при сохранении антропогенного воздействия на климатические события в ближайшем будущем увеличение значений T и IF будет происходить более высокими темпами, чем отбражено в прогнозных построениях.

ВЫВОДЫ

Ретроспективный спектральный анализ палеореконокструкций температурного режима и ледовой обстановки в акватории Восточно-Сибирского моря за последние пять тысячелетий позволил, минуя сложное имитационное физикоматематическое моделирование, построить эмпирические прогнозные модели, отображающие “естественный сценарий” динамики этих климатических явлений в ближайшие столетия без учета антропогенного фактора.

Сопоставление динамики изменения температуры приповерхностного воздуха и продолжительности безледного периода в Восточно-Сибирском море показывает синхронность в их поведении на протяжении предыдущих 5000 лет, что наиболее очевидным образом проявляется в ~ 1750 -летней квазипериодичности. Коррелированность этих показателей, судя по результатам прогнозных построений, будет наблюдаться и в будущем. Длительность безледного периода в ближайшие столетия будет иметь непрерывную тенденцию к возрастанию, приближаясь к максимальным значениям, уже наблюдавшимся в интервале последних пяти тысячелетий. Температурный режим в исследуемом регионе предположительно также будет повышаться с последующим выполаживанием на уровне около 1.8°C .

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о наличии некоторого влияния на температурный режим и ледовую обстановку изучаемого региона антропогенного фактора в индустриальный период. Поскольку прогнозные построения отражают развитие данных

природных явлений в будущем по “естественному сценарию”, не исключено, что продолжительность безледного периода и в большей степени температура воздуха за счет антропогенного воздействия будут возрастать более высокими темпами.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 21-17-00081). Методика МКАД разрабатывалась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (проект 122041400214-9).

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Цифровые данные и результаты прогноза можно запросить у авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Büntgen U., Myglan V.S., Ljungqvist F.C., McCormick M., Cosmo N.D., Sigl M., Jungclauss J., Wagner S., Krusic P.J., Esper J., Kaplan J.O., de Vann M.A. C., Luterbacher J., Wacker L., Tegel W., Kirdyanov A.V. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9 (3). P. 231–236.
2. Su Y., Liu L., Fang X.Q., Ma Y.N. The relationship between climate change and wars waged between nomadic and farming groups from the Western Han Dynasty to the Tang Dynasty period // *Climate of the Past*. 2016. V. 12. № 1. P. 137–150.
3. IPCC2014. Climate Change 2014. The Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge; N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2014.
4. Astakhov A.S., Babich V.V., Shi X., Hu L., Obrezkova M.S., Aksentov K.I., Alatorsev A.V., Darin A.V., Kalugin I.A., Karnaukh V.N., Melgunov M.S. Climate and Ice conditions of East Siberian Sea during Holocene: reconstructions based on sedimentary geochemical multiproxy // *The Holocene*. 2023. V. 33. № 1. P. 3–13.
5. Hörner T., Stein R., Fahl K., Birgel D. Post-glacial variability of sea ice cover, river run-off and biological production in the western Laptev Sea (Arctic Ocean)—A high-resolution biomarker study // *Quaternary Science Reviews*. 2016. № 143. P. 133–149.
6. Астахов А.С., Калугин И.А., Сюефа Ши, Аксентов К.И., Дарьин А.В., Лымин Ху, Бабич В.В., Мельгунов М.С., Плотников В.В. Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков Восточносибирского шельфа // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 6. С. 526–540.
7. Dong J., Xuefa S., Xun G., Astakhov A., Hu L., Liu X., Yang G., Wang Y., Vasilenko Y., Qiao S., Bosin A., Lohmann G. Enhanced Arctic Sea ice melting controlled by larger heat discharge of Holocene rivers // *Nature Communications*. 2022. V. 13. 5368.
8. Astakhov A.S., Bosin A.A., Liu Y.G., Darin A.V., Kalugin I.A., Artemova A.V., Babich V.V., Melgunov M.S., Vasilenko Yu.P., Vologina E.G. Reconstruction of ice conditions in the northern Chukchi Sea during recent centuries: Geochemical proxy compared with observed data // *Quaternary International*. 2019. V. 522. P. 23–37.
9. Шнитников А.В. Природные явления и их ритмическая изменчивость // *Чтения памяти Л.С. Берга VIII–XIV. Л.: Наука, 1968. С. 3–16.*
10. Витинский Ю.И., Конечский М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М., 1986. 296 с.
11. Nederbragt A.J., Thurow J. Geographic coherence of millennial-scale climate cycles during the Holocene // *Paleogeography. Paleoclimatology. Paleocology*. 2005. V. 221 (3–4). P. 313–324.
12. Kravchinsky V.A., Langereis C.G., Walker S.D., Druskiy K.G., White D. Discovery of Holocene millennial climate cycles in the Asian continental interior: Has the sun been governing the continental climate? // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 110. P. 386–396.
13. Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А., Дарьин А.В. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // *Сиб. экол. журн.* 2015. № 4. С. 497–506.
14. Бабич В.В., Дарьин А.В., Смолянинова Л.Г., Калугин И.А. Природные периодические процессы и вариабельность климата Северного полушария // *ДАН*. 2017. Т. 477. № 6. С. 684–687.
15. Oliveira M.J. Mudanças climáticas e ciclos naturais do clima: Passado, presente e futuro da temperatura no Brasil [Climate Changes and Natural Climate Cycles: Past, Present and Future of Temperature in Brazil]. Tese para obtenção de Título de Doutor em Ciências Universidade de São Paulo. 2021. 640 p.
16. Darby D.A., Ortiz J.D., Grosch C.E., Lund S.P. 1500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift // *Nature geoscience*. 2012. V. 5. P. 897–900.
17. Berger W.H., von Rad U. Decadal to millennial cyclicity in varves and turbidites from the Arabian Sea:

- hypothesis of tidal origin // *Global and Planetary Change*. 2002. V. 34. P. 313–325.
18. *Taricco C., Mancuso S., Ljungqvist F.C., Alessio S., Ghil M.* Multispectral analysis of Northern Hemisphere temperature records over the last five millennia // *Climate Dynamics*. 2015. V. 45. P. 83–104.
19. *Qian C.* Disentangling the urbanization effect, multi-decadal variability and secular trend in temperature in eastern China during 1909–2010 // *Atmospheric Science letters*. 2016. V. 17. P. 177–182.
20. *Бабич В.В., Дарьин А.В., Калугин И.А., Смолянинова Л.Г.* Использование периодических природных процессов для прогноза климата внетропических широт Северного полушария на ближайшие 500 лет // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 9. С. 5–15.

FORECAST OF NATURAL VARIATIONS IN AIR TEMPERATURE AND SEA ICE ON THE EAST SIBERIAN SEA SHELF FOR THE NEXT CENTURIES

V. V. Babich^{a, b, #}, A. S. Astakhov^{b, ##}

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh July 10, 2023

^a*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russian Federation*

^b*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch Russian Academy of Science, Vladivostok, Russian Federation*

[#]*E-mail: vbabich@igm.nsc.ru*

^{##}*E-mail: astakhov@poi.dvo.ru*

Based on the results of the spectral analysis of the air temperature and ice cover on the East Siberian Sea shelf reconstructed for the last five thousand years, empirical forecast models have been constructed that reflect the “natural scenario” of the dynamics of these climatic parameters during the next centuries. Based on the results of forecast constructions, in the future, the duration of the ice-free period, as well as the temperature of the near-surface air, will tend to increase. The conducted studies allow us to conclude that there is an anthropogenic influence on the temperature regime and ice conditions of the studied region, which manifested itself during the industrial period. Taking into account this factor, it can be assumed that the intensity of the studied natural phenomena will increase at a higher rate than is indicated by model constructions.

Keywords: paleoclimatology, forecast, sea ice, surface annual temperature anomalous, geochemistry, Arctic oscillation, solar radiation, East Siberian Sea